画像による人間共存ロボットの停止特性測定と完全停止の決定方法

Image Processing Measurement for Stop Performance of Collaborative Robots and Decision of Complete Stop Condition

○正 池田 博康（安衛研） 正 芳司 俊郎（安衛研）

Hiroyasu IKEDA, JNIOSSH, ikeda@s.jniosh.go.jp
Toshiro HOSHI, JNIOSSH

The robot's overall system stopping performance is one of the important factors, but the robot's complete stop condition is difficult to define and measure. To solve this problem, the complete stop condition is defined as human recognition/avoidance times against the compressive danger and the tolerable deformation of human skin. According to this definition, the image processing method is proposed to measure the overall system stopping performance of collaborative robots.

Key Words: Collaborative robot, Stop performance, Image processing, Safety

1. はじめに

ロボットの安全状態の一つは、その動作が停止していることであり、一般にインタロックによる保護停止[1]によって実現される。人に接近している産業用ロボットでは、人体への接触前に動作停止する判断を、インタロックを始動させる安全防護物の反応時間とロボット可動部が実際に完全停止するまでの時間の合計で評価している。この合計時間内に、人体がロボットに接触しないように安全距離を設定することが安全条件となる。

人間共存型ロボットにおいては、人体に接触しながら動作する場合もあるため、完全停止に至る過程で接触部位を圧迫してしまう恐れがある。そのため、安全距離は接触部位の皮膚変位を想定しなくてはならず、より慎重に完全停止時間を決定する必要がある。

しかし、現実には、ロボット可動部の停止過程における速度パターンから、速度 0 となった時間、すなわち完全停止を確定するのは困難である。そのため、ロボットの完全停止時間の標準的な測定方法も未だに確立されていない。

そこで、完全停止状態に代わる安全な状態を定義して、ロボットの停止特性を測定する方法を提案する。

2. ロボットの停止特性と停止状態の定義

2.1 機械の急停止時間例

ロボットをはじめとした可動部を有する機械が完全停止するまでの時間は、一般にオーバーラン時間と呼ばれ、機械に接近する人を検知する保護装置類の設置条件を決定する。この時間は、制動機能の劣化等により長くなることは原則許されず、安全設計上重要な因子であるにもかかわらず、物理的な完全停止状態が定義されていない。機械制動後に至る速度 0 あるいは変位変動なしをいつ判断するのか、明確でない限り停止時間を測定できない。

停止状態の定義やその測定方法を規定している例は極めて少なく、正確な急停止特性の把握が特に重要なサーボプレス機械の場合は、速度を停止判断の規範とし、可動部（スライド）の移動速度が 10mm/s 以下になったときに「急停止機能の完了[2]」と定義している。つまり、プレス機械の急停止過程は速度が単調減少するものとして、急停止操作あるいは保護装置作動からスライド速度が 10mm/s になるまでの時間を急停止時間と定義している。有限な速度が計測されていても停止と判断する事実は、完全停止の定義とその計測が難しいこ

とを示唆している。

2.2 危険な機械機能の終止

機械の安全距離を決定する上で、機械が完全停止するまでの時間は重要なパラメータの 1 つとなるが、機械の安全距離を決定するための規格[3]によれば、完全停止の前に「危険な機械機能の終止」という状態を定義している。これは人に危害が及ばない状態とされ、終止の時点を判断する要因として、人体に加わる力や運動エネルギー、接触される人体部位、接触する機械形状や材質等を考慮する。サーボプレス機械における急停止機能の完了は、「危険な機械機能の終止」に該当すると解釈される。

文献[3]では、機械の安全距離を決定するために、機械の完全停止時間ではなく危険な機械機能が終止するまでの時間を用いており、この時間と安全防護物の反応時間との合計（総合システム停止性能という）を求める。

2.3 人間共存型ロボットの総合システム停止性能

産業用ロボットの総合システム停止性能は、ロボットメーカからオーバーラン時間が提供されていれば容易に算出できるが、完全停止状態が定義されていない場合はその利用には注意が必要である。通常は、前述の危険な機械機能の終止により判断することが原則であるが、これも人体に危害が及ばない状態の定義が明確でなければ、時間の測定ができない。特に、人間共存型ロボットの場合、ロボットが人体に接触しながら動作している状況からの停止過程があり得るため、危害の程度の判断は非常に重要である。

そこで、合理的に想定される最悪条件として、ロボットアームが人体皮膚表面に触れている状態(皮膚変位 0)から、保護停止して皮膚を圧迫して変位させる過程を考える。ただし、ロボットアームは協働運転状態で十分低速であり、保護停止過程で人からロボットアームへの圧迫はないとする。このとき、人側から見た危害が及ばない条件は、次の 2 つである。

- 1) 皮膚の変位は許容値以内
- 2) 許容変位を超える前に回避可能

1) の値は、表 1 に示す痛覚耐性に基づく人体部位毎の許容変位[4] が利用できる。また、頭部以外の人体部位では 2mm までの圧縮は危害を及ぼさないとする記述もある[3]。2) については、人がロボット不意動作を検知して非常停止ボタンを操作するまでの時間を測定した報告があり、触覚による危険認知・回避時間は約 0.5s、視覚情報に基づく場合はそれよりも遅いとされた[5]。

Table 1 Measurement results of tolerable deformation of skin
(9 healthy male adult subjects)

人体 部位	許容変位 (mm) (5パーセン タイル値)	人体 部位	許容変位 (mm) (5パーセン タイル値)
額	2.1	背	13.7
胸	18.7	尻	53.0
腹	21.1	大腿	31.7
肩胛骨	16.6	膝	13.3
上腕	19.5	臍	3.2
前腕	13.6	脛ら脛	23.8
手甲	4.9		

以上より、人の危険認知・回避時間より短い時間内でロボットアームの変位量が皮膚の許容変位を超えれば、回避失敗、すなわち危害が及ぶ恐れありと見なせる。例えば、表 1 の最悪値として 2.1mm、視覚に基づく危険認知・回避時間を 1s とすると、ロボットアームの停止過程の変位量が 1s 間以上 2.1mm 以内に収まっていれば、1s の計時開始時点が「危険な機械機能の終止」状態に達したと判断される。

3. 総合システム停止性能の測定方法

ロボットの総合システム停止性能を実測する場合、保護停止を始動する安全防護物の反応時間は電気信号の変化として容易に計測できるが、危険な機械機能が終止するまでの時間は複数軸のアーム動作が対象のため、ロボットの内界センサ信号変化から得ることは現実的ではない。そのため、非接触で任意のロボット可動部の三次元動作軌跡を取得できるよう、ステレオカメラによる画像解析装置を用いる。また、人間共存型ロボットの協働運転時やマニュアル操作時は、ロボット操作者が危険認識して非常停止操作する場合も多いため、保護停止に基づく総合システム停止性能に加えて、人の危険認知・回避時間も併せて測定する。

図 1 に、人の非常停止操作時間を測定する機能を含めた総合システム停止性能の測定装置の構成と機能概略を示す。

①の測定部は、ステレオカメラによる人の非常停止装置の操作を三次元動作軌跡として記録する部分で、予期しないロボットの動作の発現(危険状態の発生)を電気信号あるいはライトの点滅により録画開始のトリガとして、人が非常停止装置を作動させるまでの間の人の動作軌跡を記録する。今後、人の危険認知特性を評価するために、録画画像の軌跡分析をオフラインの運動計測ソフトウェアにより1mm分解能で行う方法としているが、この分析結果から人の危険認知・回避時間を算出できる。

②の測定部は、安全防護物の反応時間（ロボット制御回路の応答時間を含む）を計時する部分でカウンタの機能を持つ。人が操作する非常停止操作装置の作動信号あるいは保護停止用のトリップ装置の作動信号を計時のトリガとして、ロボットのアクチュエータ動力遮断あるいは制動装置の作動開始までの時間を0.1msの精度で測定する。

③の測定部は、ロボットの可動部（人に接触する可能性の高い個所、通常エンドエフェクタ）の機械的な停止過程をステレオカメラにより記録する部分であり、①の測定部と同様のハードウェア/ソフトウェア構成である。ただし、低速度の減速・停止の挙動を高精度に記録するための高速度カメラを用いて、空間分解能 0.1mm としている。停止の判定は、可動部の対象個所の時間-変位グラフの分析により、図 2 に示すように、人の危険認知・回避時間 t_0 を時間軸上の、対象部位の皮膚許容変位量 x_c を変位軸上の判定規範として、時間規範のス

Fig. 1 Overall stop performance measuring schematic diagram

Fig. 2 Judgment of robot stop condition based on tolerable deformation

パンで変位規範を超えなくなった最初の時刻を特定し、これを停止時刻として得る。なお、①の分析結果を時間規範として利用することもできる。

④は①～③の測定結果を統合する部分であり、総合システム停止性能及び人の危険認知・回避時間を表示する。

実際の測定装置は、1 台の PC に 4 台のカメラを同カメラ用キャプチャボード経由で接続し、さらに I/O ボードを搭載し、2 組の運動計測ソフトウェアと統合制御ソフトウェアを組み込んでいる。

4. おわりに

ロボットの総合システム停止性能を、人の危険認知・回避時間と人体皮膚許容変位量から定義する考え方を示し、それに基づいて画像分析による停止性能の測定方法を提案した。今後、測定データを蓄積して最適な操作インタフェースの選定と配置等を検討する予定である。

文献

- [1] ISO 10218-1:2011, Robots and robotic devices - Safety requirements for industrial robots - Part 1: Robots, 日本規格協会, 2011.
- [2] JIS B 6410:2009, プレス機械-サーボプレスの安全要求事項, 日本規格協会, 2009.
- [3] JIS B 9715:2013, 機械類の安全性-人体部位の接近速度に基づく安全防護物の位置決め, 日本規格協会, 2013.
- [4] 齋藤剛, 池田博康, 人間協調型ロボットの機械的刺激に対する人体痛覚耐性限界の測定, 産業安全研究所特別研究報告, SRR-No.33-3, 2005.
- [5] 深谷潔, 触覚による高齢者の危険認知能力の評価産業安全研究所特別研究報告, SRR-No.13-5, 1993.